

## 論文内容の要旨

論文題名 : X-ray Spectral Studies of  
Ultra-Luminous Compact X-ray Sources in Nearby Galaxies

〔近傍銀河に見られる  
超大光度X線天体のX線分光研究〕

氏名 宮脇 良平

### 1 はじめに

1980年代に *Einstein* 衛星によって、我々の銀河系外のX線源が詳しく観測されるようになって以来、近傍の渦巻銀河の中心核でない領域には、光度が  $10^{39.5-40.5} \text{ erg s}^{-1}$  にも達するコンパクトなX線天体がしばしば存在することが知られるようになった。これらの天体の光度は、中性子星のEddington限界光度 ( $2 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ ) を1-2桁も上回る。そのためこれらの天体は、超大光度X線天体 (ULX, Ultra-Luminous compact X-ray sources; Makishima et al. 2000) と呼ばれ、もしEddington限界光度 ( $L_E$ ) を越えないならば、これらは  $\sim 100 M_\odot$  の質量をもったブラックホール (BH) に、連星の相手の星から質量が降着している系と想像される。しかし、このような質量の大きなBHの形成は、現在の星の進化の理論では説明できないため、これらULXの正体は大きな謎となっていた。

### 2 これまでの成果

1993年に打ち上げられた「あすか」衛星によって、広いエネルギー領域 (0.5-10 keV) と優れたエネルギー分解能で、初めてULXの本格的なスペクトル観測が可能になった。10個程度のULXのスペクトルが調べられた結果、光学的に厚い標準降着円盤 (Shakura & Sunyaev 1973) からの多温度黒体放射モデル (MCD) でよく表されるものが多いことが分かった (Makishima et al. 2000; Mizuno et al. 2001; Mizuno 2000)。さらに、いくつかのULXでは、MCD型のスペクトルからpower-law (PL) でよく表されるスペクトル、に状態遷移が見られた。これらの特徴は、我々の銀河系内で観測されるBH連星の典型的なスペクトルや状態遷移と良く類似するため、ULXは比較的質量の重いBH連星であるという有力な観測的根拠となった。

これらの「あすか」の成果は、その後の *Chandra* や *XMM-Newton* といったX線衛星で、より多くのULXに対して確認・強化されてきている。これらの研究を通して、ULXは高い質量降着率をもつ

の、光度はそれぞれの  $L_E$  を大きく超えてはならず、したがってそれらの BH 質量は、太陽の数十から数百倍に達する、という描像がえられてきた (e.g., Tsunoda et al. 2006; Mizuno et al. 2007)。ここでの論拠は、MCD および PL 型のスペクトルをもつ ULX は、BH 連星で観測される、Slim-disk 状態および Very-High 状態に対応している、という類推である。

### 3 課題および研究方法

ULX に対して、このような一貫した解釈が構築される一方で、それと異なる解釈も存在する。たとえば、ULX は質量にして  $30 M_\odot$  程度を超えない通常の BH 連星が、 $L_E$  を大きく超えて輝いている天体であるという解釈 (e.g., Okajima et al. 2006; Vierdayanti et al. 2006; Foschini et al. 2006)、あるいは ULX は我々に向けて強く X 線をビーム状に放射している天体である (King 2001) という解釈である。それらを採用すると、必要な BH の質量は、銀河系内で実測されている恒星質量 BH のものと大差なくなるので、天体物理学的には、質的に異なる意味をもつことになる。しかし現在のところ、§2 で述べた描像とこれら対立する解釈を、明確に区別する観測事実は乏しい。その理由の 1 つに、銀河系内の明るい BH 連星と比べて、ULX のスペクトル情報は、非常に少ない光子統計のもと、特に 10 keV 以下のエネルギー領域に限られていることが挙げられる。さらに各 ULX の観測の回数も、それらのスペクトル変化を理解する上では少なすぎた。

そこで本論文では、これまで蓄積された X 線観測データを用い、ULX の性質をより徹底的に追求し、これら競合する説を区別することを試みた。そのために、*XMM-Newton* の大量の公開データを用いて、いくつかの典型的な ULX のスペクトル発展を追求するとともに、さらに、2005 年に打ち上げられた「すざく」を用いて、従来よりも広帯域での ULX のスペクトル研究を行った。本論文の筆者は、ここで用いた「すざく」硬 X 線検出器の開発製作に、大きく寄与している。

具体的には、スペクトルの時間変化を追跡するという目的のため、我々はサンプルを、近傍 (<5 Mpc) の大光度 ( $> 5 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ ) な天体で、*XMM-Newton* と「すざく」で複数回にわたり観測がなされている 8 つの典型的な ULX (NGC1313 Source A と Source B, M81 X-6, Holmberg IX X-1, Holmberg II X-1, IC342 Source 1, NGC5204 X-1, M82 X-1) に絞った。

### 4 結果：スペクトルの時間発展

本論文では上記のサンプルについて、1 つ 1 つの観測ごとにスペクトルを作成し、その解析を行った。得られたスペクトルは全体で 44 セットである。これらのスペクトルをモデル関数で再現する標準的な解釈を行うとともに、8 天体に共通した挙動を抽出すべく、スペクトルの硬度比を  $HR1=(2-4)\text{keV}/(1-2)\text{keV}$  と  $HR2=(4-10)\text{keV}/(2-4)\text{keV}$  の 2 つの帯域で計算し、それを 2 次元上にプロットした (カラーカラープロット; CCP)。

図 1 は、サンプルである 8 つの ULX を、1 つの CCP 上に表示したものである。この CCP から、どの ULX 天体も共通したスペクトルの時間発展をすることが見てとれ、最高到達光度 ( $L_c$ ) で規格化した光度に応じて、系のスペクトル状態が主に 5 つの領域に分類できることが、世界で初めて明らかになった。それぞれの領域での特徴は、以下の通りである。

領域 1. 各天体とも、光度の最も高い ( $\approx L_c$ ) 時のデータは、この領域に来る。このときのスペクトルは  $p \sim 0.6$  の variable- $p$  円盤のモデル (Mineshige et al. 2000; Watarai et al. 2001) でよく表された。

よってこの状態での ULX は、銀河系内の BH 連星において、スリム円盤が形成されている状態に対応すると解釈できる (Sugih 2003; Tsunoda et al. 2006)。

領域 2. 光度がわずかに低くなると ( $\sim 0.6L_c$ )、データ点は CCP 上で下に移動し、領域 2 に現われる。スペクトルはより折れ曲がった形になり、単純な MCD モデルでもよく記述できるようになる。領域 1 から 2 にかけて、光度は MCD モデルの内縁温度の約 2 乗 ( $L \propto T_{in}^2$ ) に従って変動しており、この結果もまた、この状態での ULX がスリム円盤を形成しているという考え方を支持する。

領域 3. さらに光度が低くなると ( $\sim 0.4L_c$ )、データ点は CCP 上で、「遷移」を起こし、左中央に飛ぶ。実際、ここでのスペクトルはもはや MCD ではなく、よりまっすぐになり、 $\Gamma \sim 2.5$  の PL モデルでよく表されるようになる。このようなスペクトルの形に加え、スリム円盤状態より少し光度が低いという性質が一致することから、この状態での ULX は BH 連星の Very-High 状態に一致すると解釈される (Kubota et al. 2002)。

領域 4. さらに暗くなるにつれて ( $\sim 0.2L_c$ )、系は CCP 上で上に移動し、スペクトルはハード ( $\Gamma \sim 1.5$ ) になる。さらに領域 3 と 4 でのスペクトルでは、いくつかの天体で Soft-excess ( $\sim 0.3$  keV) と高エネルギー側での PL の折れ曲がり ( $\sim 6$  keV) が見られ、特に M82 X-1 という ULX では、「すぎく」の硬 X 線検出器を用い、10 keV 以上まで含めた広帯域のスペクトルにより折れ曲がりが高い信頼度で確認された。これらの性質は、低温の円盤の放射が、それを包む熱いコロナで逆コンプトン散乱されるという、BH 連星の Very-High 状態の解釈で、よく説明できる。ただし ULX の示す折れ曲がりのエネルギー ( $\sim 6$  keV) は、BH 連星のものよりも低いものであった。

領域 5. サンプルの中で 2 つの天体は、さらに光度の低い ( $\sim 0.1L_c$ ) 状態を示した。このとき、データ点は CCP 上で左下に大きく飛び、別の状態遷移があるように見える。ここでのスペクトルは非常にソフト ( $\Gamma \sim 3$ ) になり、通常の BH 連星でよく観測される状態である、High/Soft 状態のものに近くなってくる。

このようなスペクトル発展の共通性は、これら 8 つの ULX 天体と銀河系内の BH 連星が同種の天体 (すなわち質量降着する BH) であり、しかもその降着流は、物理的に類似した状態にあることを示している。したがって ULX と BH 連星は、それぞれの  $L_E$  で規格化するとほぼ同じ光度範囲にあり、観測される光度の大きな差は、両者の間での  $L_E$  の違い、よってそれらの質量の違いを反映していると考えるのが自然である。

より具体的に、CCP 上での最大光度  $L_c$  が  $L_E$  の何倍に当たるかが分かれば、これら 8 天体の  $L_E$ 、ひいてはそれらの質量が推定できる。そこで図 1 に見られる ULX の状態遷移を、銀河系内や大マゼラン雲に見られる BH 連星の同様な状態遷移と対応づけた結果、 $L_c = 0.5 \sim 4L_E$  とスケールできるという結果を得た。これより我々の解析した ULX 天体の質量は、数十から数百  $M_\odot$  と見積もられ、ULX は銀河系内/マゼラン星雲に観測される通常の BH 連星よりも、確かに大きな質量を持つという解釈が強化された。

以上のように本研究では、2000 年以來の課題であった、「ULX は通常の恒星質量 BH より有意に重い BH か?」という問いに、肯定的となる観測的な証拠を得ることに成功した。

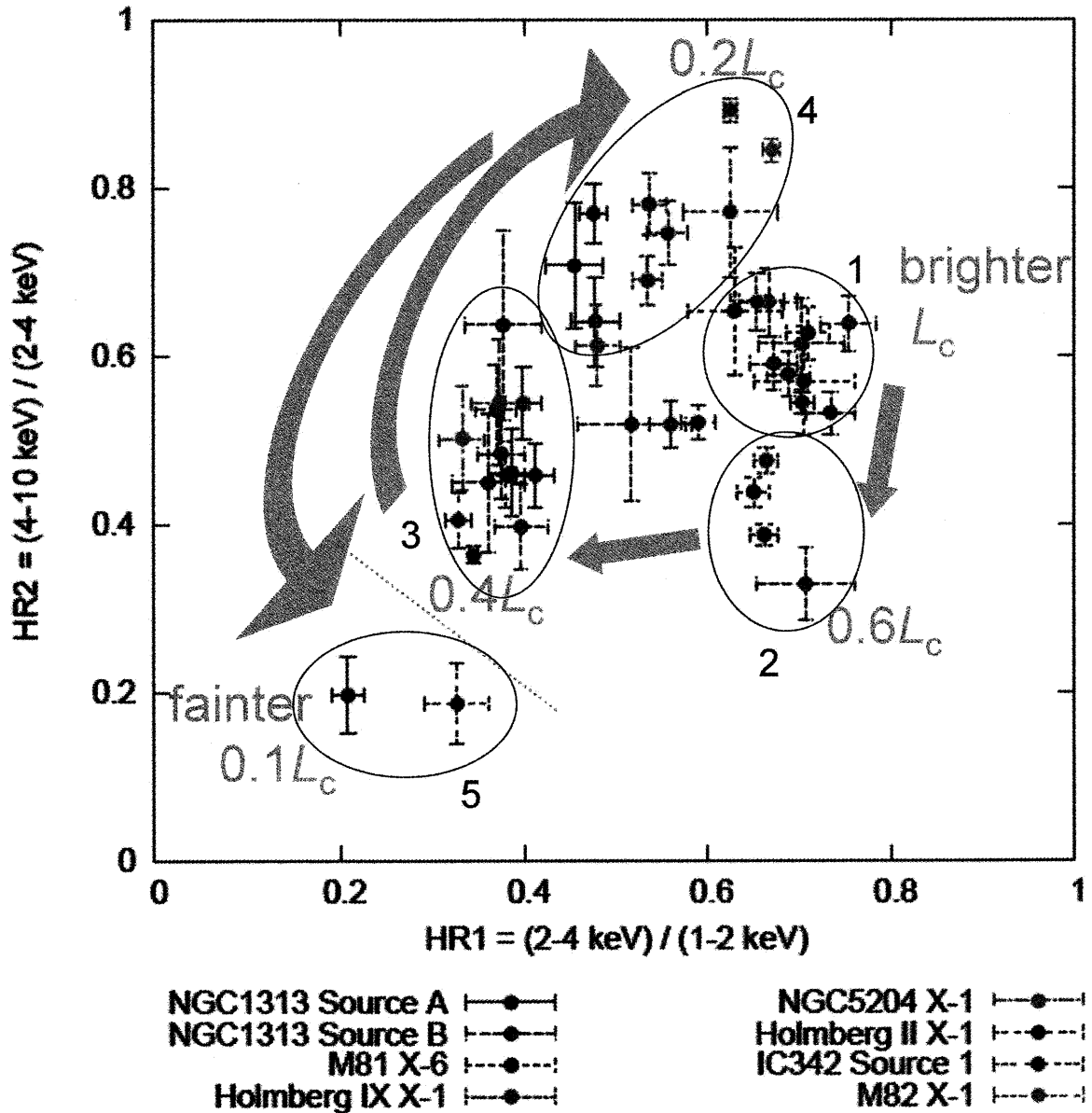


Figure 1: 本論文で解析した8個のULX天体のカラーカラープロット (CCP)。すべての天体が CCP 上で主に5つの領域に分類され、同一の領域ではよく似たスペクトルが得られる。さらにどの天体も、光度の増減とともに、共通の経路でこれら5つの領域の間を遷移する。